

## 观点

## 清洁能源的曙光：强化传热、辐射制冷与“鞭炮式”可控核聚变发电系统

杨卫民<sup>1</sup>, 张恩祥<sup>1</sup>, 赵九洲<sup>1</sup>, 赵一帆<sup>1</sup>, 唐康康<sup>1</sup>, 崔燕<sup>1</sup>, 罗贤宇<sup>1</sup>, 张震<sup>1</sup>, 李承骏<sup>1</sup>, 张锋华<sup>1\*</sup>, 高晓东<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 机电工程学院, 北京轻化工大学, 北京 100029, 中国

<sup>2</sup> 中国核电工程有限公司, 北京 100840, 中国

\* 通讯作者: 张锋华, zhangfenghua@mail.buct.edu.cn; 高晓东, GXDLPH@163.com

**摘要:** 全球气候变暖已成为人类面临的重大环境威胁与发展挑战。可控核聚变是世界公认的清洁能源理想方案, 但所需的高能引发条件和剧烈能量释放, 使现有技术都未能实现安全、稳定、长周期连续运行。为此, 本团队受到中国传统鞭炮原理的启示, 原创提出脉冲式聚变反应飞轮储能多反应堆接力运行, 驱动汽轮机长周期持续稳定发电; 在冷却介质管路中设置“洁能芯”以强化换热, 并在冷却塔表面采用辐射制冷技术以提升冷却效率并降低能耗, 从而提升系统安全性及整体能效。本文提出热端和冷端原创技术联用, 努力为可控核聚变发电开辟一条崭新的途径。

**关键词:** 鞭炮原理; 可控核聚变; 飞轮储能; 强化传热; 辐射制冷

## 1. 前言

近代工业革命以来, 人类社会高速发展对能源需求的急剧增长, 使亿万年来积累的煤炭、石油和天然气等化石能源在短时间内被集中开采利用。化石能源不仅储备有限, 而且其燃烧产生的温室气体与污染物排放, 其中煤炭燃烧每年就将产生超过 150 亿吨 CO<sub>2</sub> 排放<sup>1</sup>, 造成全球气候变暖与环境恶化, 已经让人们感觉到世界末日的威胁! 迫切需要大力发展低碳绿色的清洁能源。核聚变反应能够释放出远高于核裂变反应的巨大能量, 反应过程没有放射性污染物排放, 而且核燃料氘在广泛分布的海水中储量极大。因此, 核聚变被誉为“人类绿色清洁能源的理想解决方案”。但是, 安全、稳定、长周期运行的可控核聚变清洁能源的有效利用的重大科学技术难题仍未突破。

核聚变反应主要有氘氘聚变和氘氚聚变等, 如图 1 所示。为了使核子发生融合, 需要将氘、氚原子核压缩到近程强相互作用力范围内并克服核子间的库仑势垒。因此, 只有在极高温 (1 亿 °C 以上) 才能引发核聚变反应。氢弹爆炸所需的这种极端条件是由一颗小型原子弹点火实现的。为了和平利用核聚变反应的巨大潜能, 人们进行了长达半个多世纪的艰难探索, 在国际合作的巨大投入下, 虽然尚未完全突破, 但已见到曙光。全球关于可控核聚变的研究主要有两条技术路线, 即等离子体磁约束核聚变和惯性约束核聚变<sup>[2,3]</sup>, 其研究进展简要介绍如下。

### 1.1. 磁约束核聚变装置

磁约束核聚变需要将氘和氚加热到高温等离子体状态, 通过外部强磁场约束等离子体, 以确保高温等离子体处在特定区域内, 防止其对装置造成损伤, 同时减少能量耗散, 以保持等离子体的高温状态, 使核聚变反应持续进行<sup>[4,5]</sup>。典型的磁约束装置有托卡马克、磁镜及仿星环等。目前, 被认

为最有前景的可控核聚变反应器是托卡马克装置 (图 2a)。全球建造的全超导托卡马克装置包括中

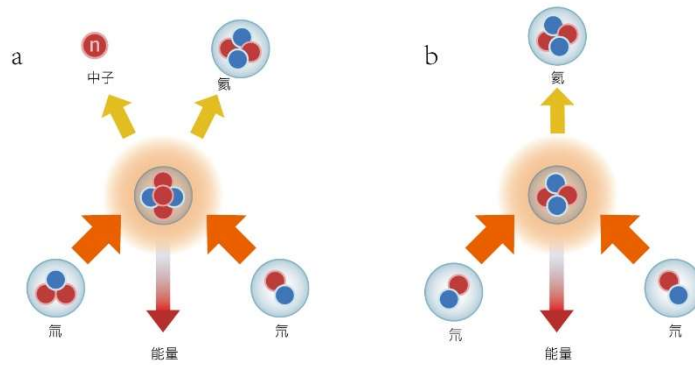


图 1. 典型核聚变反应示意图。(a)氘氚聚变; (b)氘氘聚变。

Figure 1. Typical nuclear fusion reaction diagram. (a) Deuterium-tritium fusion; (b) Deuterium-deuterium fusion.

国的东方超环 (EAST, 图 2b)、韩国的超导托卡马克 (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research, KSTAR)、日本与欧洲原子能共同体合作开发的 JT-60SA<sup>6</sup> 以及位于法国由中国、欧盟、印度、日本、韩国、俄罗斯和美国七个成员实体共同合作开发的国际热核实验反应堆 (ITER, 仍在建设中)。在建的中国聚变工程试验堆 (CFETR) 是对 ITER 设施的补充<sup>7</sup>。其第一阶段旨在初步证明聚变能产量可达 200 兆瓦, 并追求氦自给自足; 第二阶段的目标是使用超过 1GW 的聚变功率进行示范性聚变核电厂 (DEMO) 验证<sup>8</sup>。

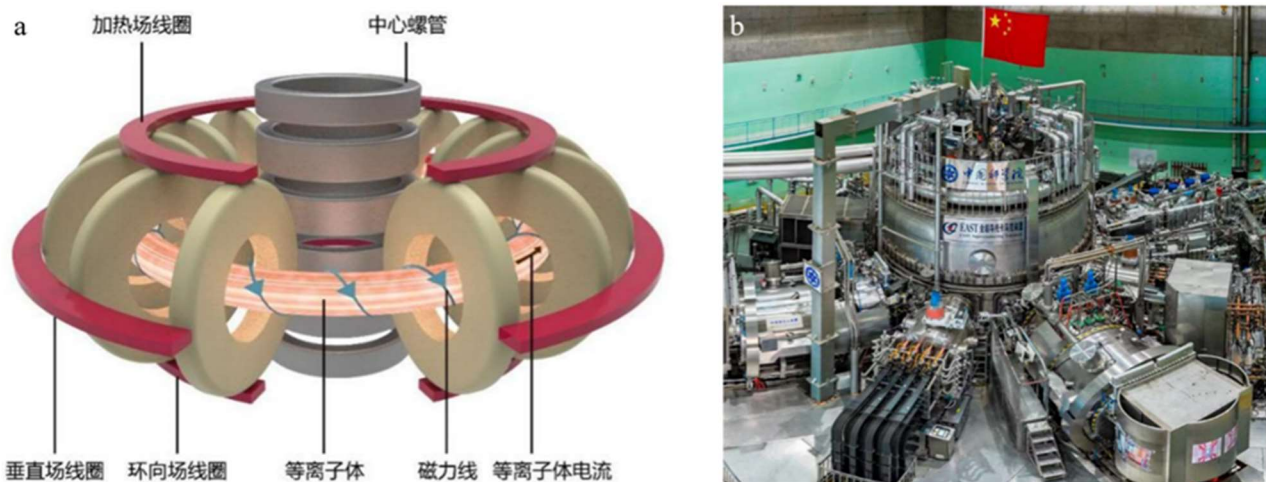


图 2. 磁约束可控核聚变。(a)托卡马克装置原理示意图; (b)中国“人造太阳”东方超环 (EAST, 图片来源: 央视网)。

Figure 2. Controlled nuclear fusion with magnetic confinement. (a) Schematic diagram of the principle of Tokamak devices; (b) China's “artificial sun”, the Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST, source: CCTV.com).

中国的东方超环 EAST 从 2006 年至今已取得多项研究突破。该装置于 2017 年创造了高约束模式下等离子体持续运行 101 秒的世界纪录, 是持续稳定运行方面的重要进展。随后, 在 2018 年, EAST 成功维持了等离子体中心电子温度达到 1 亿 $^{\circ}\text{C}$ 的稳态运行。到 2021 年, 装置继续刷新纪录, 成功实现了等离子体在 1.2 亿 $^{\circ}\text{C}$ 高温条件下运行 101 秒以及 1.6 亿 $^{\circ}\text{C}$ 高温条件下运行 20 秒。2023 年, EAST 又进一步刷新了高功率、长脉冲、高约束模式下等离子体持续运行长达 403 秒<sup>9</sup>的世界纪录。这一系列的科研成果不仅展示了 EAST 在核聚变研究中的领先地位, 而且推动了多个交叉领域技术的快速进步, 特别是超导材料、高温等离子体诊断技术以及等离子体的加热与控制技术等方面。总之, 东方

超环 EAST 为中国在核聚变领域的研究奠定了坚实的基础，成为全球可控聚变技术发展的一个重要里程碑。

## 1.2. 惯性约束核聚变装置

惯性约束核聚变反应的基本原理是利用强大的外部能源，在极短时间内对微小的聚变燃料靶材快速均匀加热并压缩至超高温和超高密度状态，使等离子体在其自身惯性作用下发生聚变反应<sup>10</sup>。该方法的优点是，不需要外部能量持续供给的情况下，利用燃料惯性实现核聚变反应的有效维持。实现惯性约束聚变点火的关键是对靶丸内部信息进行实时监测诊断和反馈，进而调整驱动功率施加方式和聚变靶丸的流体设计，减少吸收层与聚变燃料的混合，提高压缩对称性<sup>11</sup>。具体实施方式为激光点火或电磁点火。

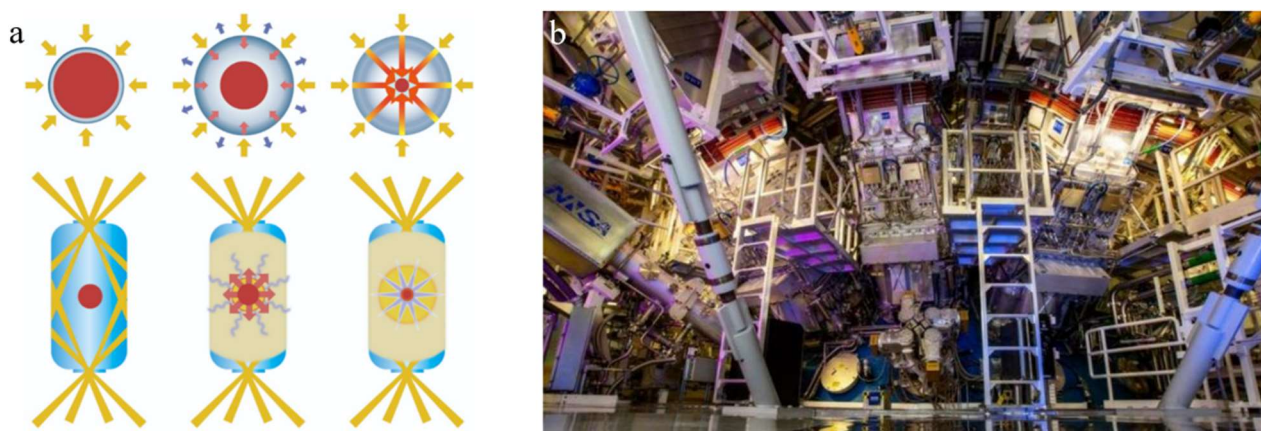


图 3. 惯性约束（激光点火）核聚变。(a)激光点火驱动方式示意图；(b) NIF 装置（图片来源：Phys.org, 美国物理学家组织网）。

Figure 3. Nuclear fusion with inertial confinement (laser ignition). (a) Schematic of the driven method of laser ignition; (b) NIF device (source: Phys.org).

20 世纪六七十年代，苏联 Lebedev 物理所投入大量人力进行激光研究。在 Basov 的提议下，该物理所着手激光聚变的研究。1968 年，他们通过激光驱动氘化锂来观测聚变中子的现象<sup>12</sup>。1971 年，他们又利用激光烧蚀压缩碳氘靶，获得了聚变中子。这是首次通过激光聚变的方式产生的聚变中子<sup>13</sup>。正是通过这些研究，他们意识到仅仅使用激光加热是无法实现能量增益的，并逐渐思考出了通过激光烧蚀驱动内爆的方法，即为如今激光点火中直接驱动的雏形（图 3a）。中国氢弹之父于敏提出将激光转换为 X 光的方法，即间接驱动。前者是将多束高能激光均匀辐照在包含氘氚燃料的微型聚变靶丸表面来驱动内爆。其结构设计比较简单，没有复杂的转换过程，能量传递直接高效。后者则是将激光照射到围绕燃料靶丸的黑腔容器内壁，容器材料被快速加热辐射出 X 射线，X 射线再均匀加热和压缩燃料靶丸。相对于前者，间接驱动方式降低了对激光均匀性的要求，并且对靶丸的压缩更加均匀，同时缓解了由于燃料靶丸表面不规则或污染可能带来的影响<sup>14</sup>。

电磁点火是采用强大的磁场来实现聚变燃料的压缩和加热。该方法将靶丸置于由多个线圈组成的笼状结构中，并将线圈与脉冲电源相连。点火时，线圈中快速变化的电流会产生迅速变动的磁场。磁场在靶丸表面或其内部诱发感生相应的强涡电流。强涡电流与外部施加的磁场相互作用，导致靶丸被压缩并引发聚变反应。

目前世界上主要的惯性约束装置有：美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的国家点火装置 National Ignition Facility (NIF, 图 3b)；法国的兆焦耳激光装置 Laser Mégajoule (LMJ)；美国罗彻斯特激光

实验室的欧米伽激光装置 (OMEGA Laser Facility)；美国桑迪亚国家实验室的 Z 脉冲动力装置 (Z Pulsed Power Facility)；日本大阪大学的 GEKKO XII 以及中国的神光-III。美国的神光 III 装置是当今世界上功率最大的在役激光驱动装置。此外，全球还有其他几大激光点火装置正在规划和建设阶段。2022 年 12 月 13 日，美国能源部及其下属的国家核安全管理局公布了一项里程碑式的成果：NIF 实验室在其最近的惯性约束聚变实验中首次实现了能量净增益<sup>15</sup>，即聚变释放的能量大于靶丸吸收的激光能量。2023 年 8 月 6 日，NIF 团队再次公开宣布他们的实验取得了比上一年更高的能量输出。NIF 团队首次证实了惯性聚变在原理上的可行性，标志着人类在迈向实现可控核聚变这一未来能源解决方案的道路上取得了重要进展。

在当前的全球能源领域，磁约束聚变和激光聚变研究呈现出高度活跃和巨大潜力。磁约束聚变方向目前正集中于托卡马克与单体器技术的发展与创新，尤其是多国参与的 ITER 项目，它已成为该领域的里程碑工程。另一方面，激光聚变主要依赖于高能量密度物理研究。值得关注的是，除了这些主流的研究机构，一些商业实体正在探寻更多形式的聚变能源方案，试图通过创新的方法和技术，将聚变能源商业化。

总之，围绕可控核聚变清洁能源科学技术突破的宏伟目标，全世界的科技工作者不畏艰辛、勇攀高峰，经过数十年的不懈努力，取得了长足的进步。但是，在核聚变反应的过程中，高温、强中子辐射和强磁场对装置造成的损伤是一个艰巨的挑战，因此实现安全、稳定、长脉冲周期运行的可控核聚变技术仍然面临着极大困难。另外，系统热管理能效不足也是一项突出的难题。

## 2. 飞轮蓄能多堆接力鞭炮式可控核聚变发电系统

我们针对上述难题创新提出一种解决方案，如图 4 所示，即热端采用飞轮蓄能的多堆接力鞭炮式可控核聚变发电系统，多个托卡马克核聚变反应堆串联连接，多堆按序列依次发生聚变反应，聚变反应热被换热器中的换热介质吸收，换热介质发生相变反应转变为气相，高温高压气体冲击汽轮机进行发电，从而实现长周期连续聚变能量输出；冷端采用“洁能芯”自清洁强化传热技术和辐射制冷技术减少无功能耗，优化传热过程，提高冷却效率。热端聚变反应释放的热能，通过强化传热高效转换提高整体能效和冷端有效降温保障系统安全。具体技术方案是通过在既是安全保障又是热能承载介质的冷却液管路中添加“洁能芯”，以强化管内外流体间的换热；并在冷却塔表面采用辐射制冷技术以提升冷却效率，从而提升整体系统安全性及能效。我们创新发明的清洁能源技术组合方案，有望促进可控核聚变技术早日实现应用，从而实现新时代“碳达峰、碳中和”的宏伟目标，推动全球经济社会的低碳绿色可持续发展。



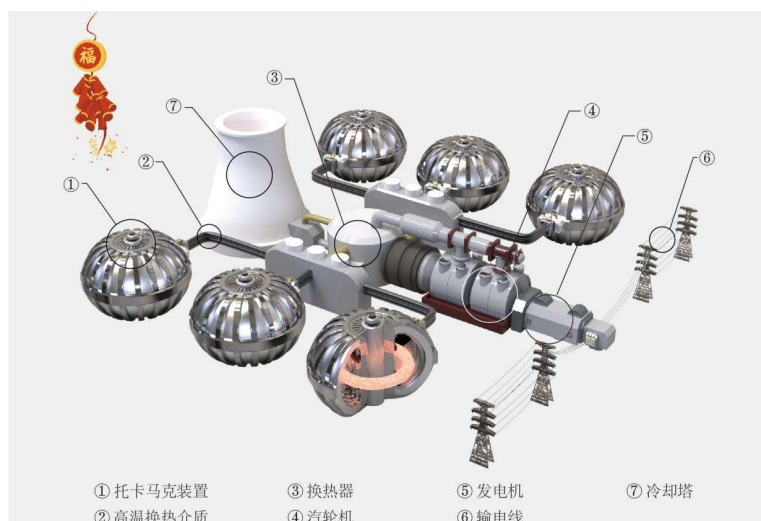


图 4. “鞭炮式”可控核聚变发电系统示意图。

Figure 4. Schematic diagram of “firecracker-style” controlled nuclear fusion power generation system.

我们创新提出的飞轮蓄能多堆接力鞭炮式可控核聚变持续发电技术有两种方案，分别是脉冲式聚变反应飞轮储能多堆接力持续发电技术和微流控氦气对撞核聚变飞轮调控持续发电技术。前者以飞轮为能量传递媒介、高能激光为点火装置，以靶丸内部氦气燃料聚变为驱动器，实现核能向电能的转化，保障整个系统的核聚变反应能够稳定、可控地进行；后者采用高能加速器对核子加速对撞实现聚变，通过控制每次输入核燃料等离子体的量，调节核聚变反应的发生及剧烈程度。同样以飞轮储能为调节器，实现脉冲聚变能量输出的削峰填谷。

### 2.1. 脉冲式聚变反应飞轮储能多堆接力连续运行

鉴于当前聚变反应堆无法长期运行的难题，本团队受到传统中国鞭炮爆炸连续性的启发，原创提出“脉冲式聚变反应飞轮储能多反应堆接力运行<sup>16</sup>”方法，驱动汽轮机长周期持续稳定发电。如图 5 所示，在核电系统的热端设置两个以上托卡马克核聚变装置，并使其按序列发生核聚变反应。从每个聚变装置收集到的能量中，一部分利用飞轮系统暂时储存，其余部分用来发电。待前一个托卡马克装置运行到极限时间后停止反应，再利用飞轮中储存的能量驱动下一个托卡马克装置进行聚变反应，如此循环往复。此方法的运作逻辑与鞭炮的连续爆炸机制相似：即为集存前一个爆竹爆炸的部分能量，用以点燃下一个爆竹。每一次短脉冲周期聚变反应类比于独立的单个爆竹爆炸过程，而飞轮则起到连接各爆竹的引线的作用。这种方法的引入，使各独立的“爆竹”爆炸过程串联有序，化离散为连续，对聚变反应脉冲热能进行削峰填谷处理以减轻压力容器负荷及疲劳损伤，实现离散聚变能到连续稳态能输出的转变。

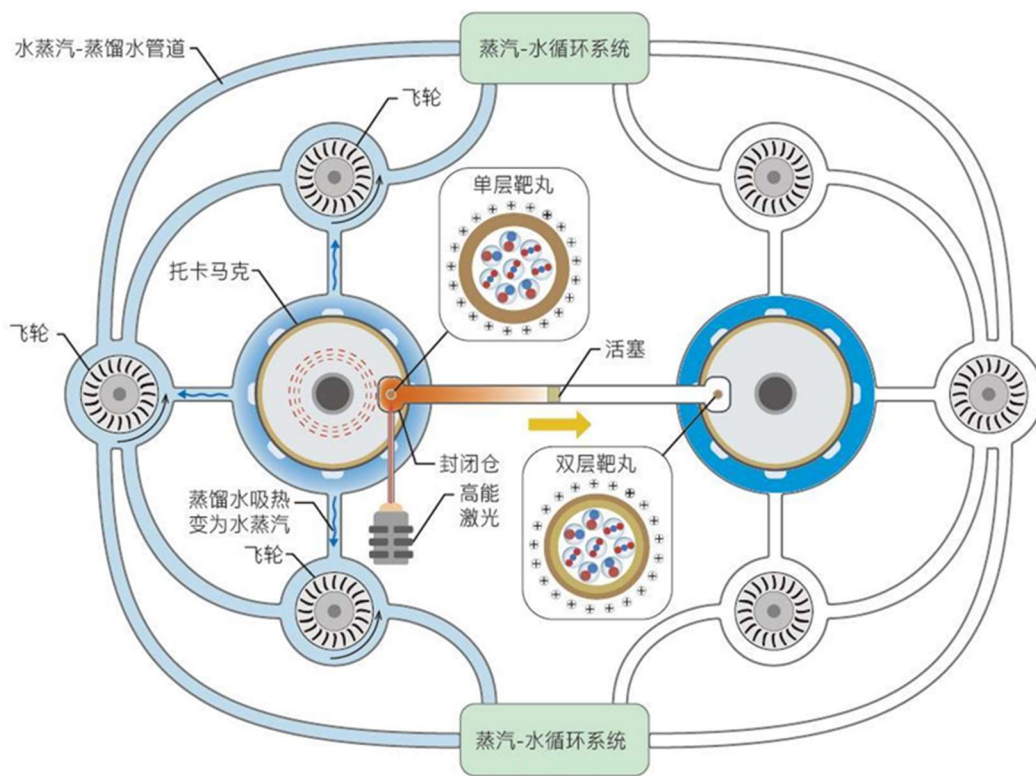


图 5. 脉冲式聚变反应飞轮储能多反应堆接力运行原理图<sup>16</sup>。

Figure 5. Schematic of the pulsed fusion reaction flywheel energy storage multi-reactor relay operation<sup>[16]</sup>.

## 2.2. 微流控粒子回旋加速对撞聚变反应

本文所述鞭炮式可控核聚变发电系统的单个“爆竹”，并不局限于托卡马克装置，也可以采用粒子回旋加速器对撞式核聚变反应器。如图 6 所示，该装置包括粒子对撞反应系统、水循环冷却系统、飞轮储能调控发电系统、粒子回旋加速器、蒸汽导引管道、抽水泵、蒸馏水加料管道、蒸馏水输送管道、磁流体发电系统和粒子传递通道等。采用准全反射球心聚焦使辐射部分返回聚变反应区，使反应区温度维持在聚变临界温度以上，以保持聚变反应持续进行。将电离后的微量核燃料等离子流体分别注入两个粒子回旋加速器<sup>17</sup>。当加速至所需能量后，这些高速粒子被射入聚变炉腔内。两束粒子在腔内相遇并对撞，形成高温高压的等离子体团。同时，通过调控外部磁场来压缩等离子体团，使得电磁能迅速转化为等离子体的内能，从而进一步提升等离子体的温度和压力，使其达到聚变的临界条件，从而引发核聚变。此方案是采用粒子回旋加速器提供聚变所需能量，即以粒子回旋加速和以飞轮储能调控，将离散的对撞融合聚变反应串联成鞭炮式持续的能量输出。显然，这里介绍的回旋加速对撞式电磁点火核聚变装置，也可以用激光点火聚变装置或其它能够维持短暂运行的核聚变装置来替代。

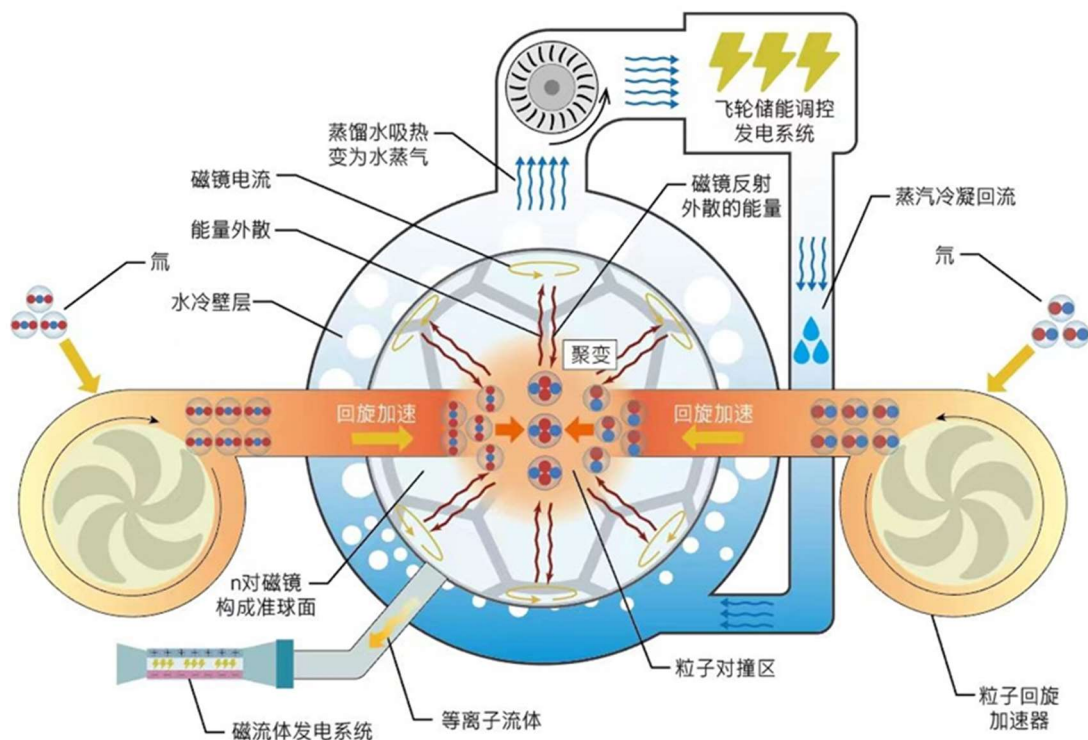


图 6. 粒子回旋加速对撞聚变反应原理图<sup>17</sup>。

Figure 6. Schematic of the particle cyclotron acceleration colliding fusion reaction<sup>[17]</sup>.

### 2.3. 鞭炮式可控核聚变系统设计意义

核聚变过程所产生的极高温条件下长时间运行，不仅会造成装置损坏，甚至会导致设备熔化。本创新思路采用强化传热快速冷却的串联脉冲式聚变反应单元和飞轮储能调控系统，可确保在一个装置需要冷却时，另一个装置可接力提供能量输出，从而将离散的能量输出转化为连续稳定的对外能量供给，满足大规模电网的技术条件要求。

综上，“鞭炮”模式为掌握可控核聚变提供了一种新的解决思路，但此方案仍需要行业内专家进行深入的验证、分析和进一步的研究，以评估其实际应用潜力与价值。

## 3. 强化传热和辐射制冷

### 3.1. 凝汽器强化传热

在核聚变技术中，冷却系统是至关重要的。聚变炉内极端的高温条件要求我们采用先进的冷却系统来有效地将等离子体产生的热量转移到外部，从而实现核能向电能的转化<sup>18</sup>。此外，长时间暴露于高温条件下，反应堆内部的材料可能会逐步劣化和损坏，高效的冷却系统保证了堆内材料完整性，进而延长了反应堆稳定运行的时间。在托卡马克装置的核心区域，尤其是第一壁和偏滤器，液态金属（例如锂）<sup>19</sup>被广泛用作冷却介质。这主要得益于液态金属出色的热导率和热容量，它们确保了热量能够被迅速且有效地传导和分散，从而避免了设备内部过热。更为关键的是，当液态金属如锂在第一壁表面流动时，其具有的中和高能氢和氦离子<sup>20</sup>的能力显著降低了设备内部结构的损伤以及放射性物质泄漏的可能。因为液态金属的流动特性，特别是其连续性和均匀性，缓解了高热流密度带来的局部热应力影响，进而为整体装置的稳定性和长期运行提供了坚实的保障。



Bergles<sup>21</sup> 认为应该将强化传热技术扩展到新的应用领域。虽然液态金属自身具有优越的冷却性能，但随着聚变技术的进步和对更高功率输出的追求，需要引入强化传热技术。合理的强化传热评价标准一直是研究学者们亟需解决的难题。Webb 和 Eckert<sup>22</sup> 首次建立强化传热技术的评价标准。Zimparov<sup>23</sup> 提出了恒热流下和恒壁温下强化传热效能标准。过增元等根据能量方程在热边界层范围内的积分，得出减小速度矢量与温度梯度之间的夹角能够有效地强化对流换热过程，即场协同理论<sup>[23-27]</sup>。近些年来，场协同理论得到很好发展。陶文铨等<sup>28</sup> 对交变流缝隙式回热器的流动和换热过程进行了数值模拟研究并进一步验证了场协同理论。其模拟结果表明，场协同原理能够用于指导交变流动过程中的强化传热。何雅玲等<sup>29</sup> 在流场和温度场协同的基础上，分析了流场和压力场的协同配合关系。夏翔鸣等<sup>30</sup> 提出了一种基于场协同理论的无因次性能因子，用于评价换热表面的强化换热综合效果。杨卫民等在管壳式换热器的强化传热研究方面开展了长期的研究，先后完成了北京市自然科学基金和“十二五”国家科技支撑计划重大项目（图 7）等多项研究课题，原创发明了“洁能芯”单元组合转子自清洁强化换热技术<sup>31</sup>。“洁能芯”是通过改变介质流动状态来提高换热效果，其原理是形成旋转流、破坏边界层、中心流体与管壁流体产生置换作用以及产生二次流等，有利于改善传热管介质流场的内部热交换，而洁能芯的旋转运动导致边界层发生破坏，减薄了边界层的厚度，提高了传热系数。其自清洁原理是增加流体的湍流度以提高污垢的剥离速率并减少污垢的沉积速率<sup>32</sup>。“洁能芯”是采用高分子材料制造的转子，具有重量轻、耐腐蚀、自润滑、使用寿命长等优点；柔性轴连接的单元组合式结构可适应传热管的弯曲和热胀冷缩的变化；流线型设计的转子使管内介质流动阻力降至最低。针对组合转子强化传热及自清洁技术，杨卫民等<sup>[33,34]</sup> 研究了大唐佳木斯第二发电厂凝汽器内安装组合转子强化传热装置后的性能及机组经济性。工业应用试验表明，凝汽器安装组合转子强化传热装置后，凝汽器真空提高较为明显，从而表明组合转子的强化传热及自清洁作用。

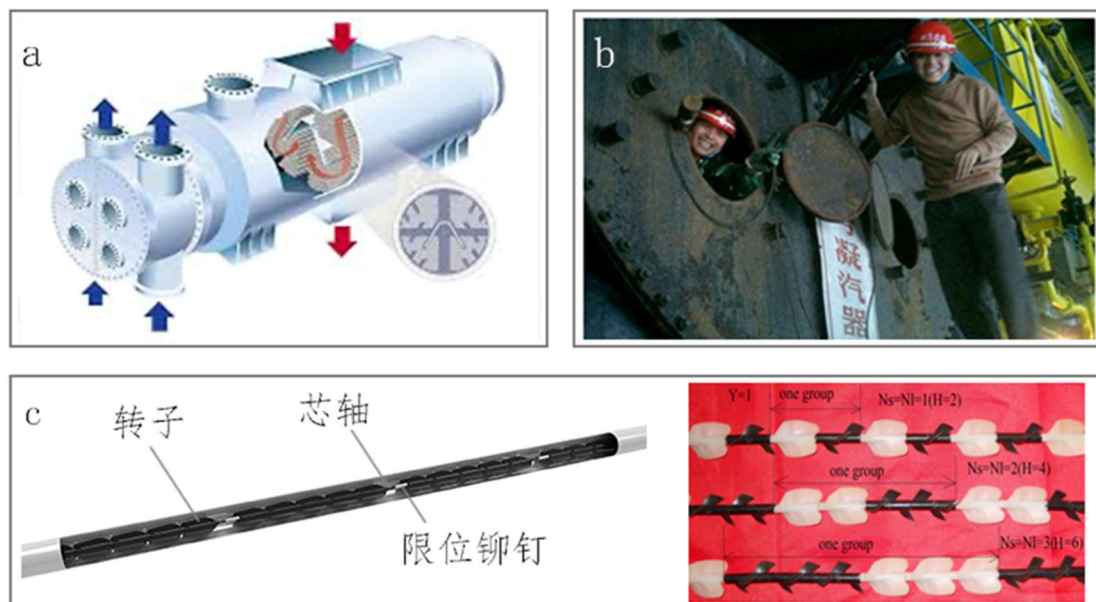


图 7. “洁能芯”转子强化换热。(a)凝汽器结构示意图；(b)60 万千瓦机组凝汽器管路中安装“洁能芯”转子；(c)“洁能芯”转子，左图为“洁能芯”转子结构示意图，右图为不同转子类型组合。

Figure 7. “Cleaning rotors” enhanced heat exchange. (a) Schematic diagram of condenser structure; (b) Installation of “cleaning rotors” in condenser piping of 600,000 kW unit; (c) “Cleaning rotors”, the left panel shows the schematic structure of “cleaning rotors”, and the right panel shows the combination of different types of rotors .



因此,结合本文所述核聚变装置的特殊要求,我们创新提出在液态金属冷却管道内部加入转子进行场协同强化传热的技术方案,可减小管道壁上形成的热边界层厚度,使冷却剂与管道壁之间的热交换更加高效。“洁能芯”强化传热技术可望为托卡马克热管理系统提供一种优化的解决方案。

### 3.2. 冷却塔被动辐射制冷

聚变系统的安全性保障,需要用冷却水对液态锂进行高效冷却,冷却塔技术创新意义重大。为此,本文创新性提出利用被动辐射制冷技术对冷却塔进行无能耗且能达到低于环境温度的冷却(图8a)。这同时也可提高整体系统能效。

不同于传统的制冷方式,被动辐射制冷技术是近年新兴的一种无需能源输入、不需要使用制冷剂、不污染环境、使用中零碳排放的绿色制冷方式,得到了人们越来越多的关注<sup>[35-43]</sup>。热力学第二定律表明,热量会自发从高温物体转移到低温物体。有温度差异的物体间能通过辐射以电磁波的形式传递热量。太空的温度低至3 K(零下270 °C)<sup>44</sup>左右,接近绝对零度,可以作为一个绝佳的冷端。如图8b所示,辐射制冷材料可将太阳光波段(0.3–2.5 μm)的能量反射走,将被冷却物体发出的热辐射以可穿透大气层的中红外射线(8–13 μm)发射到外太空来实现自发制冷<sup>[45-47]</sup>。由此可知,要达到高性能的辐射制冷需要同时满足对太阳光谱波段的高反射率和在大气窗口波段(8–13 μm)的高发射率。

尽管业内已经报道了诸如光子晶体<sup>48</sup>、超材料<sup>49</sup>、多层结构<sup>50</sup>和改性木材<sup>51</sup>等多种具有优异制冷性能的辐射制冷器,但设计一种结构可控、可批量制备、具有高稳定性耐久性 & 低成本高效益的被动辐射制冷器,对于辐射制冷技术的应用推广具有十分重要的意义。

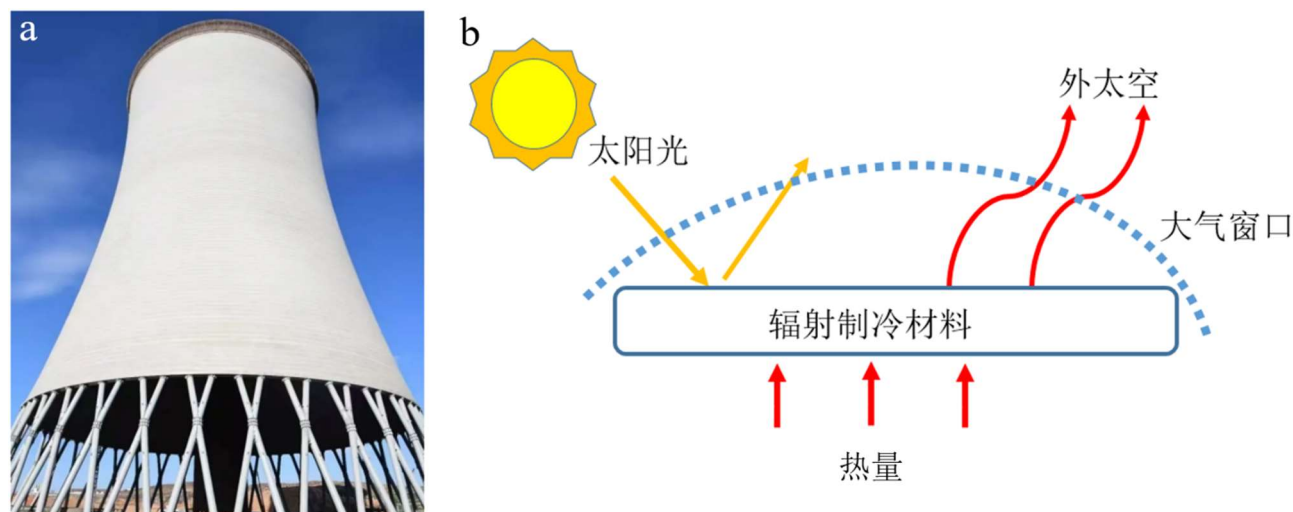


图8. 冷却塔辐射制冷。(a)冷却塔(图片来源:搜狐,北极星电力网);(b)自发制冷原理示意图。

Figure 8. Radiative cooling on a cooling tower. (a) Cooling tower (source: Sohu, Polaris Power Network); (b) Schematic diagram of the principle of spontaneous cooling.

本团队通过多学科交叉融合研究,探究微纳尺度光学及热力学机理,创新研发出具备高太阳光反射率和高红外发射率特性的多级多孔微纳结构薄膜。微米到纳米尺度的小孔可以有效地反射可见光波段的太阳光能量,减少物体升温,同时也可增强聚合物在大气窗口波段的发射率,从而强化辐射制冷性能。我们将团队特色的“彩虹丝”熔体微分静电纺丝技术(图9a)与纳米流体技术相结合,将聚合物和无机微纳米粒子进行共混制备复合颗粒进行静电纺丝,在复合颗粒熔融后通过超声空化法引入微纳气泡,通过添加无机散射粒子<sup>[52,53]</sup>与微纳气泡<sup>[54-59]</sup>的方式制备了新型复合辐射制冷电纺

薄膜 (图 9b), 通过实验、模拟和工艺优化提升了薄膜的制冷性能, 采用电子显微镜测量其微观结构形貌 (图 9c), 并采用紫外分光光度计及傅里叶变换红外光谱仪测量其对太阳光谱波段的反射率 (99.2%) 和大气窗口波段的发射率 (95%)。从图 9d 中可以看出, 制得的样品在大气窗口波段的发射率远高于相同温度下的铝合金。通过搭建室外测温平台检测薄膜的制冷温差及功率, 实现了 10 °C 左右的亚环境降温效果, 且制冷功率超过 100 W/m<sup>2</sup>。我们所制备的辐射制冷薄膜每平米每年能够节省制冷用电量 928.5 kWh, 若在核电系统获得推广应用将带来巨大的安全、环境和经济效益。

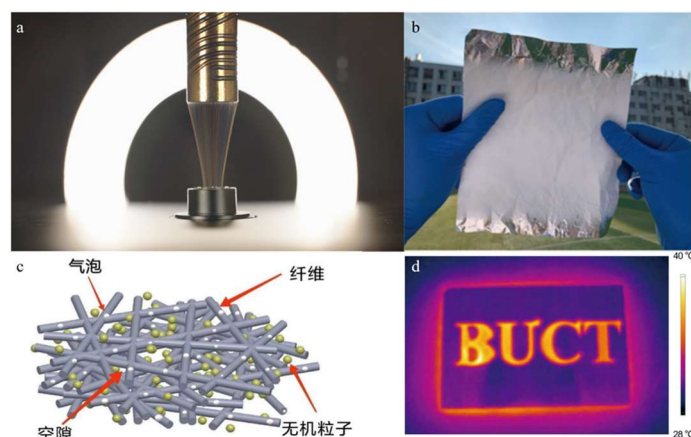


图 9. “彩虹丝”纳米纤维复合材料辐射制冷膜。(a)彩虹丝熔体微分静电纺丝；(b)辐射制冷薄膜外观；(c)辐射制冷薄膜微结构示意图；(d)相同温度的辐射制冷膜与带有镂空 BUCT 字样的铝合金片的红外成像。

**Figure 9.** “Rainbow silk” nanofiber composite radiative cooling membrane. (a) Rainbow filaments of the microdifferentiated melt electrostatic spinning; (b) Appearance of the cooling film; (c) Schematic diagram of the microstructure of a radiative cooling film; (d) Infrared imaging of a radiative cooling film beneath a sheet of aluminum alloy with hollowed-out BUCT lettering at the same temperature.

## 4. 总结与展望

可控核聚变是清洁能源科学技术的重要研究方向, 经过半个多世纪的艰难探索, 已经让人们看到了希望的曙光。近年来, 世界多国争相报道最新研究进展, 从中国的全超导托卡马克长周期运行记录到美国激光点火首次实现能量的净增益等。但可控核聚变长周期连续运行发电的可行技术方案始终未见报道, 更少有关于解决核聚变发电系统热管理和高效解决方案的研究成果分享。

为此, 本文创新提出鞭炮式可控核聚变发电系统的技术方案。通过飞轮蓄能调控串联多个聚变单元接力运行达到安全、稳定、长周期连续发电的工业化应用目标。同时, 为解决系统热管理能效低的问题, 提出强化传热和辐射制冷的优化方案, 在换热器管道内部设置“洁能芯”实现自清洁强化传热; 并拟将原创发明的“彩虹丝”纳米纤维辐射制冷薄膜用于发电系统的冷却塔, 为实现核聚变热能的高效率收集和转化利用开辟一条崭新的路径。

未来, 加速可控核聚变技术的发展需要全世界的科技工作者共同努力。通过支持创新技术方案的验证和原型开发, 借助人工智能和数字孪生技术, 创新研发出工业化的可控核聚变发电系统, 实现“人造太阳”供给人类低碳绿色的清洁能源。

## 作者贡献

概念: 杨卫民; 方法: 杨卫民、张恩祥、张震、崔燕、罗贤宇; 调查: 张恩祥、赵九洲、赵一帆、唐康康、李承骏、高晓东; 写作一原稿准备: 杨卫民、张恩祥、赵九洲、赵一帆、唐康康、张锋华; 写作一审阅和编辑: 杨卫民、张锋华、李承骏、高晓东; 可视化: 张恩祥、赵一帆、赵九洲;

指导：杨卫民；项目管理：杨卫民、张锋华；资金获取：杨卫民、张锋华。所有作者已阅读并同意手稿的出版版本。

## 资金

本研究由中国原子能科学研究院（资助编号 H2021103）与江苏新视界先进功能纤维创新中心有限公司资助（资助编号 H2022536）。

## 利益冲突

作者声明无利益冲突。

## 参考文献

1. Guo L, Ou Z, Liu Y, et al. Technological innovations on direct carbon mitigation by ordered energy conversion and full resource utilization. *Carbon Neutrality* 2022; 1: 4. doi: 10.1007/s43979-022-00009-5
2. Wang N. *Fusion Energy and Its Future* (Chinese). Tsinghua University Press; 2001.
3. Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain. *Physics of Plasmas* 1995; 2: 3933–4024. doi: 10.1063/1.871025
4. Fisch NJ. Plasma physics and controlled nuclear fusion. In: Libby SB, van Bibber KA (editors). *Modern Physics and the Scientific Legacy of Edward Teller*, Proceedings of the Edward Teller Centennial Symposium; 28 May 2008; California, USA. World Scientific; 2010.
5. Wesson J, Campbell DJ. *Tokamaks*. Oxford University Press; 2011.
6. Barabaschi P, Kamada Y, Shirai H, JT-60SA Integrated Project Team. Progress of the JT-60SA project. *Nuclear Fusion* 2019; 59(11): 112005. doi: 10.1088/1741-4326/ab03f6
7. Zhuang G, Li GQ, Li J, et al. Progress of the CFETR design. *Nuclear Fusion* 2019; 59(11): 112010. doi: 10.1088/1741-4326/ab0e27
8. Li J, Wan Y. Present state of Chinese magnetic fusion development and future plans. *Journal of Fusion Energy* 2019; 38: 113–124. doi: 10.1007/s10894-018-0165-2
9. Ye H. A brief analysis of EAST tokamak and related fusion research in China (Chinese). *Science and Innovation* 2021; 12: 92–93. doi: 10.15913/j.cnki.kjycx.2021.12.037
10. Pfalzner S. *An Introduction to Inertial Confinement Fusion*. CRC Press; 2006.
11. Zhao Y, Xiao G, Li F. Current status and development of inertial confinement fusion physics research based on modern gas pedals (Chinese). *Physics* 2016; 45(2): 98–107. doi: 10.7693/wl20160204
12. Basov NG, Ivanov YS, Krokhin ON. Neutron generation in spherical irradiation of a target by high-power laser radiation. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* 1972; 15(10): 417–419.
13. Pavlovskii AI. Reminiscences of different years. *Soviet Physics Uspekhi* 1991; 34(5): 429. doi: 10.1070/PU1991v034n05ABEH002378
14. Gao S, Wu X, He Z, et al. Research progress of fabrication techniques for laser inertial confinement fusion target. *High Power and Particle Beams* 2020; 32: 032001. doi: 10.11884/HPLPB202032.200039
15. Huang H, Ma L. Current status of fusion energy development (Chinese). *China Science and Technology Information* 2023(4): 120–122, 125.
16. Yang W, Zhang E. Pulsed Microfluidic Fusion Impulse Flywheel Control Continuous Power Generation Technology (Chinese). CN Patent 116,110,617, 12 May 2023.
17. Yang W, Zhang E. Microfluidic Deuterium-Tritium Collision Nuclear Fusion Flywheel Control Continuous Power Generation Technology (Chinese). CN Patent 116,434,980, 14 July 2023.
18. Stacey WM. *Fusion Plasma Physics*, 2nd ed. Wiley-VCH; 2013.
19. Lyublinski IE, Vertkov AV. Experience and technical issues of liquid lithium application as plasma facing material in tokamaks. *Fusion Engineering and Design* 2010; 85(6): 924–929. doi: 10.1016/j.fusengdes.2010.08.036
20. Humrickhouse PW, Merrill BJ, Yoon SJ, Cadwallader LC. The impacts of liquid metal plasma-facing components on fusion reactor safety and tritium management. *Fusion Science and Technology* 2019; 75(8): 973–1001. doi: 10.1080/15361055.2019.1658464
21. Bergles AE. Advanced enhancement-third generation heat transfer technology or “the final frontier”. *Transaction of the Institute of Chemistry Engineering* 2001; 79 (Part A): 437–444.
22. Webb RL, Eckert ERG. Application of rough surfaces to heat exchanger design. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 1972; 15(9): 1647–1658. doi: 10.1016/0017-9310(72)90095-6



23. Zimparov V. Extended performance evaluation criteria for enhanced heat transfer surfaces: Heat transfer through ducts with constant heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2001; 44(1): 169–180. doi: 10.1016/S0017-9310(00)00074-0
24. Wang S, Li ZX, Guo ZY. Novel concept and device of heat transfer augmentation. In: Proceedings of 11th International Conference of Heat transfer; 1 November 1998; Kyongju, Korea. Taylor Fancis; 1998. pp. 405–408.
25. Guo ZY, Li DY, Wang BX. A novel concept for convective heat transfer enhancement. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 1998; 41(14): 2221–2225. doi: 10.1016/S0017-9310(97)00272-X
26. Guo Z. Physical mechanism of convective heat transfer and its control: Synergy between velocity and heat flow fields (Chinese). *Science Bulletin* 2000; 45(19): 2118–2122. doi: 10.3321/j.issn:0023-074X.2000.19.020
27. Guo Z, Wang S. Novel concept and approaches of heat transfer enhancement. In: *Proceedings of Symposium on Energy Engineering in the 21st Century (SEE2000) Volume I–IV*. Begell House; 2002. pp. 118–126. doi: 10.1615/SEE2000.90
28. Tao W, He Y, Huang P. Numerical validation of field synergy theory in an alternating flow slit-type heat rector (Chinese). *Journal of Engineering Thermophysics* 2003; 24(4): 649–651.
29. He Y, Lei Y, Tian L, et al. Exploration of the three-field synergy of high-efficiency low-resistance enhanced heat transfer technology (Chinese). *Journal of Engineering Thermophysics* 2009; 30(11): 1904–1906.
30. Xia X, Zhao L, Xu H, Yang S. Comprehensive performance evaluation factors for enhanced heat transfer based on field synergy theory (Chinese). *Thermodynamic Engineering* 2011; 26(2): 197–201.
31. Zhang Z. *Research on Heat Transfer Enhancement Mechanism and Performance of Assembled Rotors* (Chinese) [PhD thesis]. Beijing University of Chemical Technology; 2014.
32. Li Y, Ding Y, Yang W. Numerical analysis of the working principle of cleaning rotors and its industrial application (Chinese). *Petrochemical Equipment* 2009; 38(6):73–76.
33. Yang W, Li F, Chen S, Yan H. Industrial experimental study of combined pipe-end rotor enhanced heat transfer device (Chinese). *Thermodynamic Engineering* 2008; 23(4): 378–381.
34. Li FX, Ding YM, Guan CF, et al. Laboratory investigation and commercial test for rotors-assembled strand applied in smooth tube. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2008; 33(1): 1–9. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2008.04.005
35. Cui Y, Luo X, Zhang F, et al. Progress of passive daytime radiative cooling technologies towards commercial applications. *Particuology* 2022; 67: 57–67. doi: 10.1016/J.PARTIC.2021.10.004
36. Li T, Zhai Y, He S, et al. A radiative cooling structural material. *Science* 2019; 364(6442): 760–763. doi: 10.1126/science.aau9101
37. Yin X, Yang R, Tan G, Fan S. Terrestrial radiative cooling: Using the cold universe as a renewable and sustainable energy source. *Science* 2020; 370(6518): 786–791. doi: 10.1126/science.abb0971
38. Wang H, Xue C, Guo X, et al. Superhydrophobic porous film for daytime radiative cooling. *Applied Materials Today* 2021; 24: 101100. doi:10.1016/J.APMT.2021.101100
39. Zhong H, Li Y, Zhang P, et al. Hierarchically hollow microfibers as a scalable and effective thermal insulating cooler for buildings. *ACS Nano* 2021; 15(6): 10076–10083. doi: 10.1021/ACS.NANO.1C01814
40. Liang J, Wu J, Guo J, et al. Radiative cooling for passive thermal management towards sustainable carbon neutrality. *National Science Review* 2023; 10(1): nwac208. doi: 10.1093/NSR/NWAC208
41. Poredoš P, Wang R. Sustainable cooling with water generation. *Science* 2023; 380(6644): 458–459. doi: 10.1126/science.add1795
42. Cai C, Chen W, Wei Z, et al. Bioinspired “aerogel grating” with metasurfaces for durable daytime radiative cooling for year-round energy savings. *Nano Energy* 2023; 114: 108625. doi: 10.1016/J.NANOEN.2023.108625
43. Li J, Fu Y, Zhou J, et al. Ultrathin, soft, radiative cooling interfaces for advanced thermal management in skin electronics. *Science Advances* 2023; 9(14): eadg1837. doi: 10.1126/sciadv.adg1837
44. Fixen DJ. The temperature of the cosmic microwave background. *The Astrophysical Journal* 2009; 707(2): 916–920. doi: 10.1088/0004-637X/707/2/916
45. Hossain MM, Gu M. Radiative cooling: Principles, progress, and potentials. *Advanced Science* 2016; 3(7): 1500360. doi: 10.1002/advs.201500360
46. Zhao D, Aili A, Zhai Y, et al. Radiative sky cooling: Fundamental principles, materials, and applications. *Applied Physics Reviews* 2019; 6(2): 021306. doi: 10.1063/1.5087281
47. Farooq AS, Zhang P, Gao Y, Gulfam R. Emerging radiative materials and prospective applications of radiative sky cooling—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2021; 144: 110910. doi: 10.1016/J.RSER.2021.110910
48. Raman AP, Anoma MA, Zhu L, et al. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. *Nature* 2014; 515(7528): 540–544. doi: 10.1038/nature13883
49. Zhai Y, Ma Y, David SN, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling. *Science* 2017; 355(6329): 1062–1066. doi: 10.1126/science.aai7899

50. Tian Y, Liu X, Wang Z, et al. Subambient daytime cooling enabled by hierarchically architected all-inorganic metapaper with enhanced thermal dissipation. *Nano Energy* 2022; 96: 107085. doi: 10.1016/J.NANOEN.2022.107085
51. Chen Y, Dang B, Fu J, et al. Cellulose-based hybrid structural material for radiative cooling. *Nano Letters* 2021; 21(1): 397–404. doi: 10.1021/ACS.NANOLETT.0C03738
52. Son S, Jeon S, Chae D, et al. Colored emitters with silica-embedded perovskite nanocrystals for efficient daytime radiative cooling. *Nano Energy* 2020; 79: 105461. doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105461
53. Li X, Peoples J, Yao P, Ruan X. Ultrawhite BaSO<sub>4</sub> paints and films for remarkable daytime subambient radiative cooling. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2021; 13(18): 21733–21739. doi: 10.1021/ACSAMI.1C02368
54. Gao H, Zhang F, Tang K, et al. Green cleaning of 3D-printed polymeric products by micro-/nano-bubbles. *Nanomaterials* 2023; 13(11): 1804. doi: 10.3390/NANO13111804
55. Zhou L, Li Z. Exploring the standard system of micro bubble technology. *Water Purification Technology* 2021; 40: 75–87.
56. Zhang L, Chen H, Li Z. Long lifetime of nanobubbles due to high inner density. *Science in China Series G: Physics Mechanics & Astronomy* 2008; 51(2): 219–224. doi: 10.1007/s11433-008-0026-5
57. Yu Z, Li J, Zhang X. A new hypothesis for cavitation nucleation in gas saturated solutions: Clustering of gas molecules lowers significantly the surface tension. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 2022; 50: 347–351. doi: 10.1016/J.CJCHE.2022.06.009
58. Li P, Wang J, Liao Z. Microbubbles for effective cleaning of metal surfaces without chemical agents. *Langmuir* 2022; 38(2): 769–776. doi: 10.1021/ACS.LANGMUIR.1C02769
59. Zhang R, Gao Y, Chen L, et al. Nanobubble boundary layer thickness quantified by solvent relaxation NMR. *Journal of Colloid and Interface Science* 2022; 609: 637–644. doi: 10.1016/J.JCIS.2021.11.072

---

**Perspective****Dawn of clean energy: enhanced heat transfer, radiative cooling, and firecracker-type controlled nuclear fusion power generation system****Weimin Yang<sup>1</sup>, Enxiang Zhang<sup>1</sup>, Jiuzhou Zhao<sup>1</sup>, Yifan Zhao<sup>1</sup>, Kangkang Tang<sup>1</sup>, Yan Cui<sup>1</sup>, Xianyu Luo<sup>1</sup>, Zhen Zhang<sup>1</sup>, Chengjun Li<sup>1</sup>, Fenghua Zhang<sup>1,\*</sup>, Xiaodong Gao<sup>2,\*</sup>**<sup>1</sup> College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China<sup>2</sup> China Nuclear Power Engineering Co. Ltd., Beijing 100840, China**\* Corresponding authors:** Fenghua Zhang, zhangfenghua@mail.buct.edu.cn; Xiaodong Gao, GXDLPH@163.com

---

**Abstract:** Global climate change has become a major environmental threat and development challenge facing humanity. Controllable nuclear fusion is a globally recognized ideal solution for clean energy, but its required high-energy triggering conditions and intense energy release prevent existing technologies from achieving safe, stable, and long-term continuous operation. Here, inspired by the traditional Chinese firecrackers, we propose a pulse fusion reaction flywheel energy storage multi reactor relay operation to drive the steam turbine to continuously and stably generate electricity for a long period of time; meanwhile, to install cleaning rotors in the cooling medium pipeline to enhance heat exchange, and to use radiative cooling technology on the surface of the cooling tower to improve cooling efficiency and to reduce energy consumption, thereby improving system safety and overall energy efficiency. Proposing the combination of original technologies at both the hot end and the cold end of the system, we strive to open up a new way for controllable nuclear fusion power generation.

**Keywords:** principle of firecrackers; controlled nuclear fusion; flywheel energy storage; enhanced heat transfer; radiative cooling

---